

ORIGINAL ARTICLE

금강 주요지점에서의 환경 인자와 남조류 세포수의 배타적 인과성분석

김연화 · 이은형 · 김경현¹⁾ · 김상현*

부산대학교 환경공학과, ¹⁾국립환경과학원 수질통합관리센터

Analysis of Exclusive Causality between Environmental Factors and Cell Number of Cyanobacteria in Guem River

Yeonhwa Kim, EunHyung Lee, Kyunghyun Kim¹⁾, Sanghyun Kim*

Water Resource Environmental Lab, Pusan National University, Pusan 46241, Korea

¹⁾National Institute of Environmental Research, Water Quality Control Center, Incheon 22689, Korea

Abstract

Algal blooming in 4 major rivers introduces substantial impacts to water front activity. Concentrations of algae are increasing at major points along the Geum River. Ecosystem food webs can be affected by algal blooming because blue-green algae release toxic materials. Even though there have been many studies on blue-green algae, its causality to environmental factors has not been completely determined yet. This study analyzed the exclusive correlation between various hydrometeorological, water quality, and hydrologic variables and the cell number of cyanobacteria to understand causality of blue-green algae in the Geum River. A prewhitening process was introduced to remove the autocorrelation structure and periodicity, which is useful to evaluate the effective relationship between two time series.

Key words : 4 major river, Pre-whitening process, Exclusive cross correlation analysis, Time series analysis, Blue green algae, Algal blooms

1. 서론

1.1. 연구의 목적 및 배경

홍수와 가뭄, 수질개선 및 생태계 복원의 강의 건강성을 회복할 목적으로 진행된 4대강 사업은 한강, 금강, 영산강, 낙동강의 16지점에서 보를 건설하는 사업으로 2009년부터 2012년까지 진행되었다. 그러나 최근에는 4대강 유역 하천에서 녹조 현상이 빈번히 발생하여 수경관 훼손 및 악취 등으로 친수 활동에 부정적인 영향을 주

고 있다(Chong et al., 2015). 특히 금강과 영산강 지점은 녹조류의 대 번성이 해가 갈수록 심화하고 있는 것으로 보고되었다(MOE, 2015).

남조류의 대 번성은 부영양화된 수역에서 종 다양성이 감소하고 1종 또는 소수의 남조류가 우점하여 대량 증식하는 현상이다. 남조류는 가장 원시적인 분류군으로 단세포이며 핵막이 없고 엽록소를 가지고 있어 광합성을 한다(Christoffersen and Kaas, 2010). 우리나라는 온대 몬순 기후에 속하여 여름철 집중강우와 갈수기, 풍수기

Received 1 April, 2016; Revised 27 June, 2016;

Accepted 30 June, 2016

*Corresponding author : Sanghyun Kim, Water Resource Environmental Lab, Pusan National University, Pusan 46241, Korea

Phone : +82-51-510-2479

E-mail : kimsangh@pusan.ac.kr

© The Korean Environmental Sciences Society. All rights reserved.

© This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

에 유량의 편차가 크기 때문에 남조류 대 발생 (algae bloom)에 의한 피해가 더욱 가속화되고 있다(Kim et al., 2014). 우리나라 하천에서 녹조의 발생 원인은 대부분 남조류에 의한 것이며, 그 중 *Microcystis*, *Anabaena*, *Aphanizomenon*, *Oscillatoria* 등은 환경부에서 유해 남조류로 지정하였다. 유해 남조류는 독소물질을 배출하여 이를 직간접적으로 섭취 또는 흡수하는 수생생태계에 심각한 위협을 초래할 수 있다(Kim et al., 1995).

국내 남조류에 관한 주된 연구분야는 남조류 발생과 환경 및 생물 요인 간 상호작용에 관한 연구와 남조류 독성 생성 물질 및 독성 평가 연구 그리고 남조류 제어기술 연구 등의 연구가 활발히 진행되고 있지만 남조류 발생 기작은 완전히 규명되지 못하고 있다(NIER, 2014). 또한, 4대강 공사 후 국내 외 남조류 발생원인 및 형태, 제어방법들에 관한 선행연구가 매우 미흡하다는 점에서 금강유역을 대상으로 기상·수질·영양염류·수문 시계열과 유해 남조류 세포 수 간의 종합적인 상관성을 분석하여 하천 수중생태계 특성과 남조류 성장 제한 인자를 규명하는 것이 의미 있는 연구가 될 것으로 판단된다.

또한, 기존의 조류 관련 연구에서는 인자들 간 인과관계를 규명하기 위해 인공신경망이나 비선형 기법, EFDC 등의 수치모델 기법이 이용되어 왔다(Choi et al., 2015; Jeong, 2004). 하지만 이러한 방법은 매개변수나 입력자료의 수가 방대해 복잡하고, 계산 시간이 늘어난다는 단점이 있다. 남조류와 환경인자 간의 선형적인 상관 분석은 고도화된 모델을 개발할 때 지점별 인자를 적절하게 사용하게 하여 보다 실용적이고 타당성 있는 예측변수를 입력할 수 있는 선행 연구가 될 것이다.

대부분의 시계열 분석 연구는 단순 상관계수 분석으로 수문 시계열 자료가 정상성이나 독립성을 지니고 있다고 가정하고 분석을 한다. 그러나 시계열 수문 자료는 관측 값과 인접한 값들이 독립이 아니라, 상호 상관성이 존재하므로 서로 독립이 아닌 다변량 시계열 자료에 대해서 백색 잡음 과정(white noise)을 통해 추세나 주기성을 제거하는 과정이 필요하다(Yun, 2010). 따라서, 이 연구에서는 선백색화 과정을 통해 대상 시계열의 독립성을 구현한 후 유해 남조류 세포수와 환경인자와의 상호 상관성을 효과적으로 평가하고자 하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 연구 대상 지역

이 연구는 금강수계 내의 세종보, 공주보, 백제보의 4대강 공사 후인 2012년부터 2015년 사이의 3년간의 일주 간격의 자료 156개 대상으로 수행한 시계열 분석이다. 강수량과 일사량 등의 기상자료는 기상청의 기상자료개방포털(<https://data.kma.go.kr>)이 제공하는 대상 지점과 가장 근접한 지역의 기상대 자료를 이용하였다. 수질과 남조류 세포수 자료는 물 환경 정보 시스템(<http://water.nier.go.kr>)이 제공하는 자료를 사용하였다. 세종보는 금남, 공주보는 금강, 백제보는 부여의 수질측정망 지점 자료를 사용했다. 남조류 세포 수는 금강물환경연구소에서 제공하는 세종보, 공주보, 백제보에서 직접 측정된 자료를 사용하였다. 유입량과 저수량 등의 수문 자료는 국가 수자원 관리 종합 정보시스템(<http://www.wamis.go.kr>)의 자료를 활용했다. Fig. 1은 금강유역에서 각 보의 위치를 나타낸 그림이다. 점으로 표시된 지역은 각각 세종보와 공주보 백제보의 위치를 나타내고, 세종보는 세종특별자치시 연기면 세종리, 공주보는 충남 공주시 우성면 평목리, 백제보는 충남 부여군 부여읍 자왕리에 위치한다.

금강 수계의 유역면적은 총 9,959 km²로 4대강 구역 중 낙동강, 한강 다음으로 3번째로 큰 유역이다. 지형적 조건을 살펴보면 차령산맥과 소백산맥, 노령산맥으로 이어지는 산악지형이 유역의 경계를 형성하고 있고, 중하류 쪽에는 청원 평야와 논산평야가 형성되어 있다. 강수량은 1,200 ~ 1,300 mm/년이며 유로연장은 397.8 km이다. 금강수계의 총 인구는 2005년 기준 2,953천명에서 2015년에는 3,232천명으로 9.45% 증가하였으며, 중류 지역은 인구증가 상류 및 하류 지역은 인구 감소를 보여주고 있다. 축산 현황은 2015년에는 전체 두수 24,207천두로 소, 돼지, 가금 등 주요 축종이 증가하고 있다. 또한, 대청댐이 위치하는 금강 상류는 가파른 산지가 발달하고 경사가 급하여 지표면 유출속도가 빨라 우기에 강우유출이 높아지나, 하류는 완만한 지형을 이룬다고 보고되었다(평균 경사 20% 미만, 상류 12.4%, 하류 31.9%). 금강 수계 오염 부하량은 2005년 기준 오염물질 배출 부하량 중 점오염원보다 비점오염원이 더 큰 비율을 차지했다(MOE, 2015).

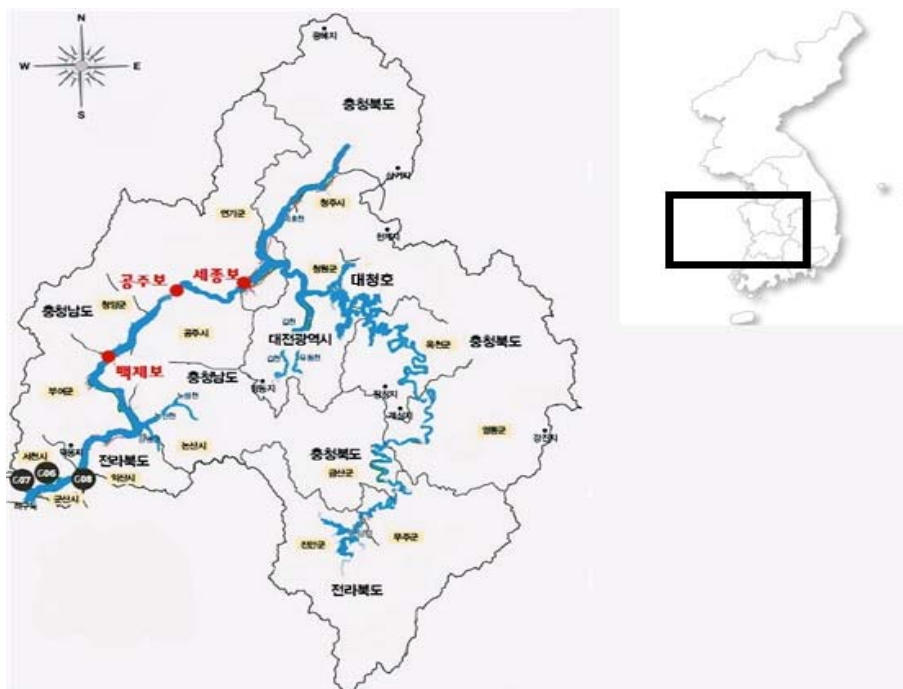


Fig. 1. Map showing the sampling sites.

2.2. 방법론

선 백색 처리과정(pre-whitening process)을 위한 시계열 모형은 다음과 같다.

$$\varnothing_x(B) \cdot X_t = \theta_x(B) \cdot u_t \tag{1}$$

여기서, B는 $B^k X_t = x_{t-k}$ 이고 후향 연산자(backward operator)를 의미한다. k는 지체시간이다. 따라서 식(1)의 항들은 다음 식과 같이 나타난다.

$$\varnothing_x(B) = 1 - \varnothing_1 B - \varnothing_2 B^2 - \dots - \varnothing_n B^n \tag{2}$$

$$\theta_x(B) = 1 - \theta_1 B - \theta_2 B^2 - \dots - \theta_m B^m \tag{3}$$

식(3), (4)를 이용한 일련의 모의과정(선처리, 진단, 모형구성, 매개변수추정 검증 등)을 수행한 후 모형이 도출되면 이 모형을 이용하여 다른 시계열의 추계학적인 구조를 제거하는데 사용한다.

$$\varnothing_x(B) \cdot Y_t = \theta_x(B) \cdot u_t \tag{4}$$

이와 같은 과정을 통해서, 식(1)과 (4)를 이용한 선 백색 처리 시계열이 확보되는데, 두 시계열 사이의 배타적 상관관계를 보여주는 잔차에 대한 상호상관함수는 (5)의 식으로 나타난다.

$$r_{uv,k} = \frac{C_{uv,k}}{(C_{u,0} \cdot C_{v,0})^{0.5}} \tag{5}$$

여기서, $C_{u,0}$ 와 $C_{v,0}$ 는 각각의 잔차 시계열의 분산추정이고, $C_{uv,k}$ 는 공분산으로 다음의 식(6)과 (7)과 같이 계산된다. 여기서, N은 시계열의 개수이고 k는 지체시간이다.

$$C_{uv,k} = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^{N-k} u_{t+k} \cdot v_t, \quad k \geq 0 \tag{6}$$

$$C_{uv,k} = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^{t=1-k} u_{t+k} \cdot v_t, \quad k < 0 \tag{7}$$

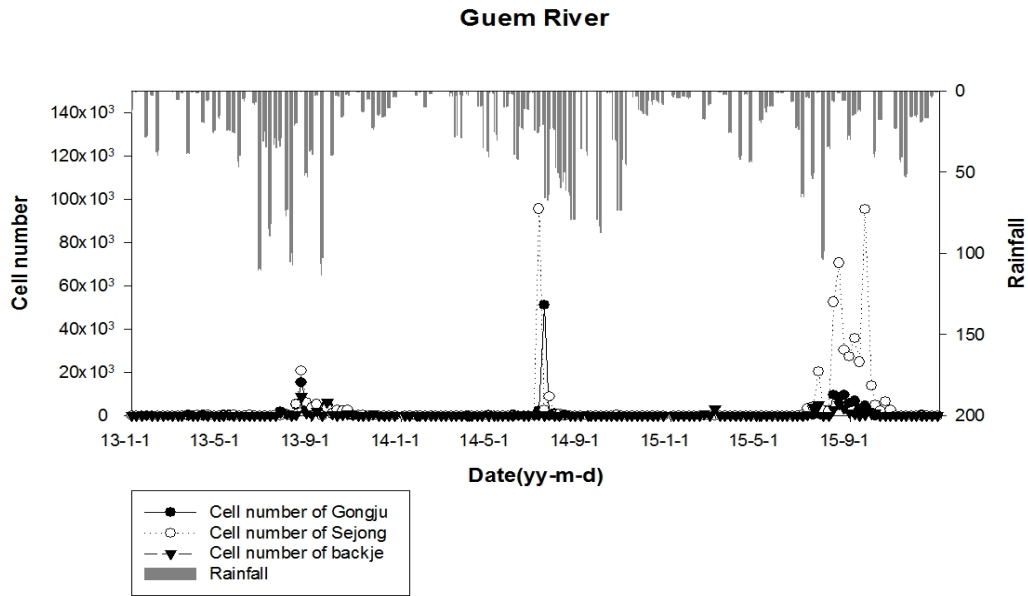


Fig. 2. Cyanobacteria cell number & rainfall at Geum River.

3. 모의 과정 결과

3.1. 기본 통계 분석

Fig. 2는 세종보, 공주보, 백제보의 강수량과 남조류 세포수의 3년간 시계열 자료를 나타낸 그림이다. 조사 기간 중 세 지점 모두 6~9월에 집중적으로 발생하는 특징을 보였으며, 대부분 8월경 가장 높은 세포수를 보였다. 또한, 남조류의 발생 형태는 여름철에 급격히 발생한 후 곧 감소하는 경향을 보이고 남조류의 대 번성에 의한 침투도가 나타나는 시기는 높은 강수량이 나타나는 시기와 유사한 경향을 보였다.

수집된 남조류 세포수의 시계열 자료를 이용하여 평균, 표준편차, 분산, 첨도, 왜도등을 산출하였다. Table 1은 남조류 세포수 관련 인자들을 파악하기 위한 기초 통

계 분석 결과이다. 평균은 금강의 세종보, 공주보, 백제보 순으로 하류로 갈수록 평균과 표준편차, 분산이 증가한다. 강은 하류로 갈수록 하폭이 넓고, 유속이 느려지므로 남조류 세포수의 현존량이 증대되는 것이 일반적이다. 분산은 최소값과 최대값의 차이가 클수록 크게 나타난다. 왜도와 첨도는 정규분포와 밀접한 관계를 맺고 있는데 3개 지점 모두 큰 양의 값으로 분포의 대칭 정도가 우측으로 기울어져 있음을 알 수 있다. 첨도는 공주보가 99.21으로 가장 크고 세종보가 24.81으로 가장 작은 값을 보인다. 왜도 역시 공주보가 9.26으로 가장 크고 세종보가 4.66으로 가장 작다.

3.2. 비정상 시계열의 정상화

본 연구에 사용된 시계열 분석에 관한 수학적 계산은

Table 1. Statistical analysis of the cell number

site	mean	STD deviation	variance	kurtosis	skewness	minimum	maximum
Sejong weir	383.33	1,168.92	1,366,364	24.81	4.66	0	8,902
Geum River Gongju weir	986.82	4,508.11	20,323,059	99.21	9.26	0	50,970
Backje weir	3,592.87	13,634.17	185,890,713	29.98	5.27	0	95,500

Table 2. Improvement of original data at the 3 weirs

	Sejong weir		Gongju weir		Backje weir	
	raw data	Box-cox transformation	raw data	Box-cox transformation	raw data	Box-cox transformation
mean	383.33	-58.8734	986.82	-66.46	3,592.87	-132.65
STD deviation	1,168.92	48.41	4,508.11	45.94	13,634.17	94.07
variance	1,366,364	2,344.14	20,323,059	211.62	1.86E+08	8,848.76
skewness	4.66	0.46	9.26	0.82	5.27	0.73
kurtosis	24.81	-1.79	99.21	-1.32	29.98	-1.47
minimum	0	-97.02	0	-97.03	0	-198
maximum	8,902	2.43	50,970	2.46	95,500	1.99

Scientific Computing Associates Corporation의 Liu가 개발한 SCA 프로그램을 사용하여 분석을 하였다(Liu et al., 1992). 자연현상인 환경인자나 수문학적 변수들은 지속적인 영향(memory effect)의 특성을 가진다. 그래서 대부분 평균과 분산, 공분산이 시간의 흐름에 따라 변하는 비정상 상태이다(Yun et al., 2010). 이러한 자료의 분석을 위해서는 우선 정상성(stationarity) 조건을 만족하도록 변환해 주어야 한다. 금강 수계 3개 보의 시계열 자료의 정상성은 왜도를 확인함으로써 점검하고 비정상적인 분포 특성이 존재한다고 판단되었을 때는 Box-Cox 전이식을 이용하여 변환(transformation)을 수행하였다. Box-cox 변환은 등분산과 정규성을 모두 만족하므로 가장 일반적으로 사용되는 멱 변환 방식이며, 식 8과 같고 사용된 λ 는 전이 매개변수이다. Table 2는 Box-cox 변환을 이용한 데이터 변환 결과이다. 세종보의 경우 왜도가 4.66에서 0.46으로 공주보는 0.26에서 0.82로, 백제보는 5.27에서 0.73으로 모두 원 자료 보다 정규 분포에 가까운 형식으로 변환하여 등분산과 정규성 조건을 만족하였다.

$$T(X_t) = \frac{X_t^\lambda - 1}{\lambda} \quad (8)$$

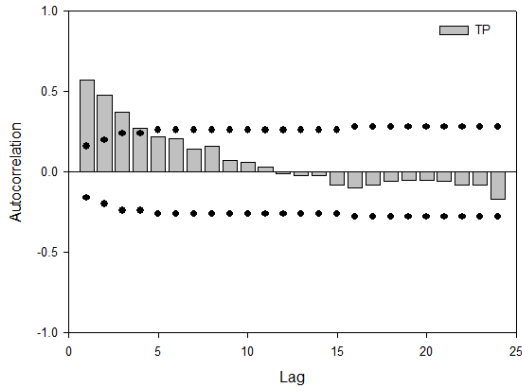
3.3. 모형의 식별

정상성이 확보된 시계열 자료는 표본 자기상관함수(auto correlation function: ACF)와 표본 부분자기상관

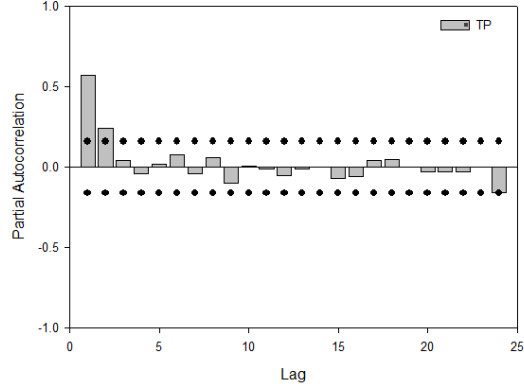
함수(partial autocorrelation function: PACF)를 이용한 식별방식과 식별통계량을 최소화 하는 akaike's information criterion (AIC(p,q)), schwarz's bayesian information criterion (SBC(p,q))을 이용한 식별방식 그리고 패턴 식별법인 ESACF (extended sample ACF)을 계산하여 식별하는 방식이 있다(Box et al., 2015).

Fig. 3은 표본 ACF와 표본 PACF를 이용한 식별과 ESACF를 계산한 공간적 자기상관구조 식별과정이다. ACF와 PACF는 시계열이 가지고 있는 특성을 파악하여 모형 식별뿐만 아니라 시계열의 정상성 여부를 점검하는데 유용하게 사용된다. Fig. 3(a)~(d)에서 공주보 총인(T-P)과 세종보 수위 ACF와 PACF는 모두 지수적으로 감소하므로 ARMA(1,1)의 모형 구조 특성을 보여준다. (e)와 (f)는 백제보와 공주보 TOC의 EACF를 이용한 모형추정 결과이다. 이는 백제보의 SS는 ARMA(2,1), 공주보의 TOC는 ARMA(1,1)의 모형구조가 적합하다는 것을 의미한다(Salas et al., 1988).

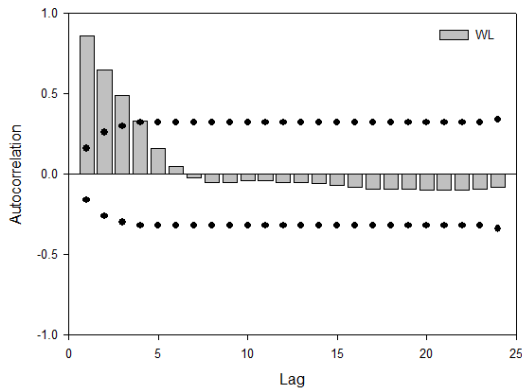
Table 3은 3년치 수문, 수질, 기후학적 요인과 남조류 세포수의 ARMA(p,q) 모형을 표로 정리한 것이다. 강수량은 3개보 모두에서 ARMA(0,1)의 모형을 가졌고 나머지는 그 자체의 추계학적 모형을 ARMA 모형으로 나타낼 수 있었다. 대부분의 인자의 추계학적 구조가 ARMA(1,1)과 ARMA(1,0)의 경향을 보이고 있으며, 이는 자료 자체의 자기 상관성이 존재한다는 것을 의미한다.



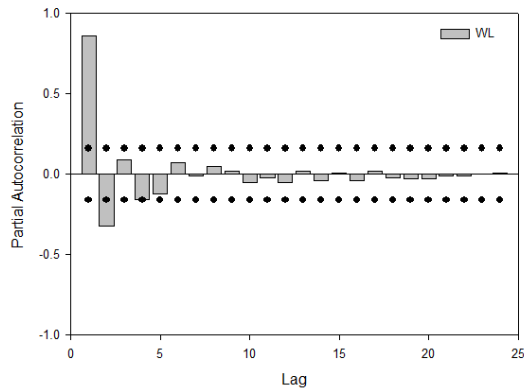
(a) ACF for TP



(b) PACF for TP



(c) ACF for water level



(d) PACF for water level

SIMPLIFIED EXTENDED ACF TABLE (5% LEVEL)

(Q-->)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
(P= 0)	X	X	X	X	X	X	0	0	0	0	0	0	0
(P= 1)	X	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
(P= 2)	X	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
(P= 3)	0	X	X	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
(P= 4)	0	X	X	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
(P= 5)	X	X	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
(P= 6)	X	X	X	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

(e) ESACF for SS

SIMPLIFIED EXTENDED ACF TABLE (5% LEVEL)

(Q-->)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
(P= 0)	X	X	X	X	X	X	0	0	0	0	0	0	0
(P= 1)	X	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
(P= 2)	X	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
(P= 3)	X	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
(P= 4)	X	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
(P= 5)	X	X	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
(P= 6)	X	0	X	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

(f) ESACF for TOC

Fig. 3. Auto-correlation function, partial auto-correlation function, extended sample auto correlation function structure identification process.

Table 3. ARMA(p,q) models of environmental variables and cell number

	ARMA (p,q)	Sejong weir	Gongju weir	Backje weir
General env.	Solar quantity	(2,0)	(1,1)	(1,1)
	Wind speed	(1,0)	(1,1)	(1,0)
	Water temp.	(2,1)	(2,1)	(1,1)
	Rainfall	(0,1)	(0,1)	(0,1)
Water quality	BOD	(1,1)	(1,1)	(1,1)
	COD	(1,1)	(1,1)	(1,1)
	DO	(1,0)	(1,0)	(2,0)
	EC	(1,1)	(1,1)	(1,1)
	SS	(1,1)	(1,1)	(2,1)
	TOC	(1,1)	(1,1)	(1,1)
	pH	(1,0)	(1,1)	(1,0)
	Cell	(1,0)	(1,1)	(2,1)
Nutrient salts	TN	(1,1)	(1,1)	(1,0)
	TP	(1,0)	(1,1)	(1,0)
	PO4P	(1,1)	(1,2)	(1,0)
	NH3N	(1,0)	(2,0)	(1,2)
Hydrology	Overflow	(1,0)	(1,0)	(1,0)
	Out-flow	(1,1)	(1,1)	(1,1)
	In-flow	(1,0)	(2,1)	(1,0)
	Water lever	(1,1)	(2,1)	(2,1)
	Storage	(1,0)	(2,0)	(1,1)

3.4. 모형의 검진

모형화 과정을 거친 잔차 시계열에 대한 자기상관함수와 편자기상관함수로 나타내면 Fig. 4와 같다. Fig. 4 그래프의 모든 시차에서 자기 상관도가 높은 추계학적 구조가 제거되어 신뢰구간 내에 값이 존재한다. 자기상관함수와 편자기상관함수의 신뢰구간 내에 분포하는 모형구조는 자기상관도가 높은 데이터를 제거하여 무작위한 변동성이 있는 잔차로 선백색 처리 기법을 적용한 결과이다. Fig. 5의 (a)는 백제보의 선백색화 처리 전 남조류 세포수와 전기전도도의 상호상관함수(cross correlation function) 결과로 신뢰구간을 벗어나는 초월 값이 많이 분포하고 사인 함수 모양의 주기성이 존재한다. 자료변환 후 ARMA 모형 식별 과정에서 자료들의 추계구조를 확인하고 선백색화 처리 기법을 적용하여 추출한 난수

들의 모형구조를 도출한 것은 Fig. 5(b)에 나타내었다. 선백색화 처리 후 남조류 세포수와 전기전도도의 상호상관함수 결과는 반복적인 사인 함수 모양의 주기성이 완전히 제거되어 적합한 모형이 도출되었다. Fig. 5의 (c)는 공주보의 선백색화 처리 전 남조류 세포수와 총인의 상호상관함수 결과로 -15주의 지체시간이 긴 시간에서 초월 값이 분포하는 등 물리적으로 발생할 수 없는 현상의 오류를 보여주고 있다. Fig. 5(d)의 선백색화 처리 후 남조류 세포수와 총인의 상호상관함수 결과는 시차가 큰 부분이 신뢰구간 내에 존재하고, -1주와 1주에서 초월 값이 보이는 등 주기성이 완전히 제거된 물리적으로 타당성이 있는 모양으로 나타났다. 이와 같은 선백색화 처리 과정은 효과적인 배타적 상관분석을 위해 모든 환경인자와 남조류 세포수 자료에 수행되었다.

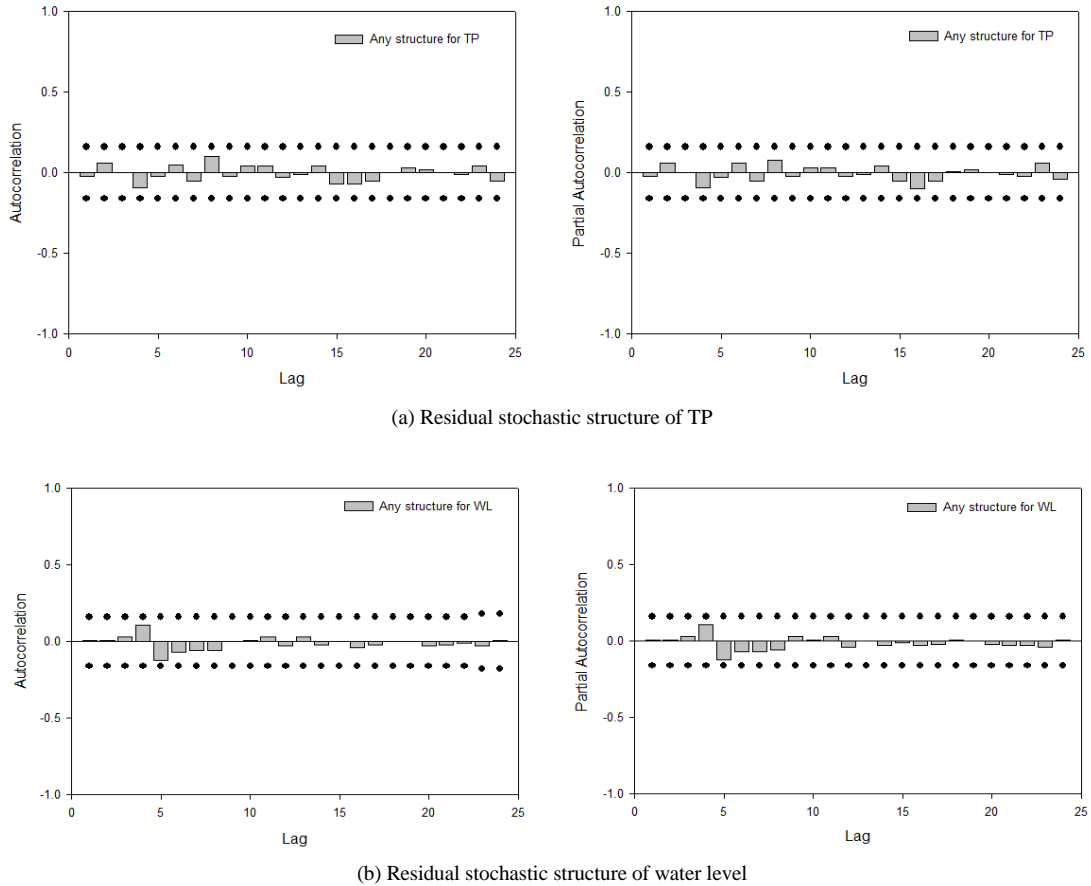


Fig. 4. Residual stochastic structure of Gongju weir and Sejong weir.

4. 결과

4.1. 금강 수계 내 동시적 배타적 상관성 분석 결과

선 백색화 과정을 적용한 분석결과 중 지체시간(lag)이 0일때의 상관계수의 크기는 남조류 세포수 증감에 시간차이가 없는 환경인자와의 동시적인 증감의 인과성을 의미한다. Table 4는 세종보에서 0의 시차(lag), 선백색화 처리 후 0의 시차, 선백색화 처리 후 음의 시차와 양의 시차에서의 상호상관함수를 도출한 결과이다. 금강의 중류에 위치하는 세종보의 경우 선 백색화 처리 후 0의 시차에서 수질학적 인자인 BOD, COD, SS, TOC, Chl-a의 양의 상관성이 두드러졌다. 금강의 중류와 하류에 위치하는 다른 보와는 달리 기상학적 인자인 강수량도 양

의 상관성을 보였다. 풍속 또한 0의 시차에서 양의 상관성을 보였는데, 이는 풍속의 감소는 수체의 성층강도를 강화한다(Paerl et al., 2011)는 기존의 연구와 다른 결과이다.

Table 5는 공주보에서 0의 시차(lag), 선백색화 처리 후 0의 시차, 선백색화 처리 후 음의 시차와 양의 시차에서의 배타적 상관분석 결과를 정리한 것이다. 금강의 중류에 위치하는 공주보의 경우 선백색화 처리 전 상호상관함수 결과는 전기전도도와 방류량, 유입량의 경우 상관성이 보이지 않지만, 선백색화 처리 후 상관성을 보인다. 이는 단순한 피어슨 상관계수(Pearson correlation function)만으로 환경인자들을 검정했을 때의 결과가 치명적인 오류를 갖고 있다는 것을 명확히 보여준다. 선백

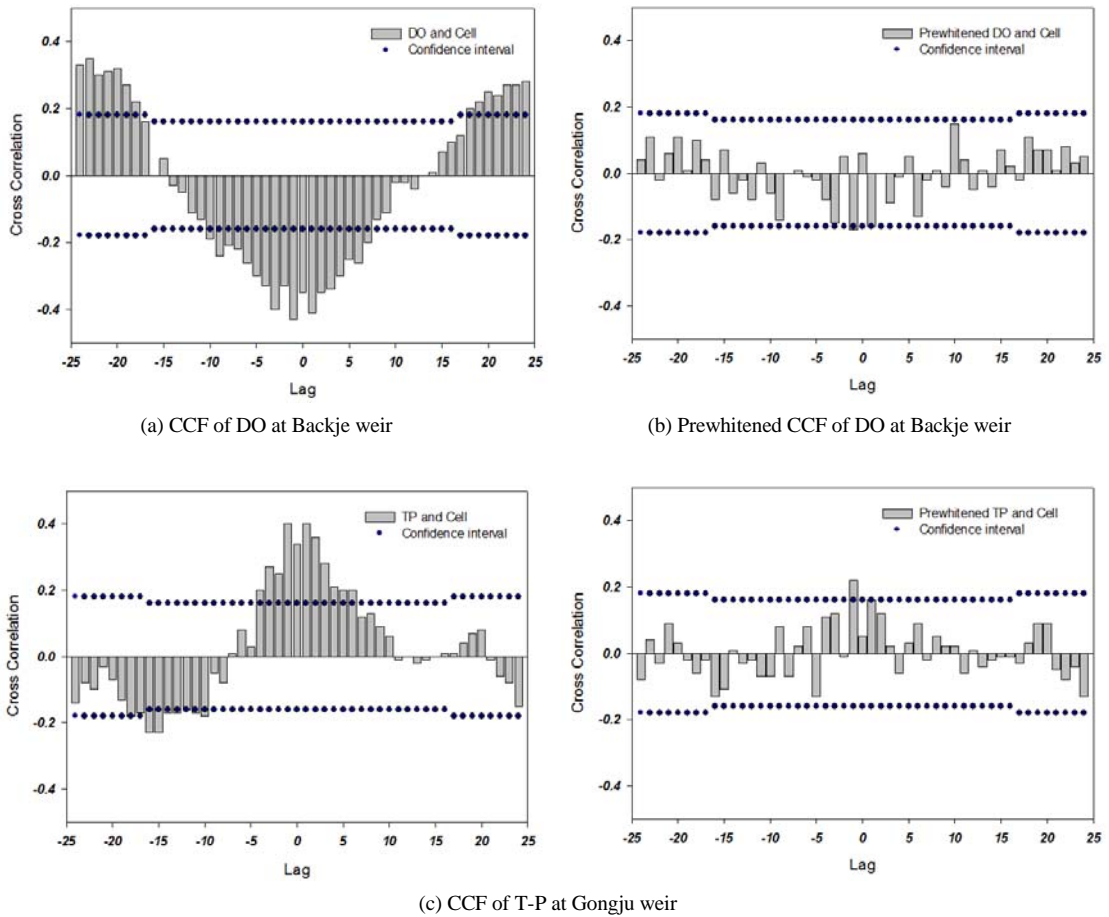


Fig. 5. Cross correlation function and prewhitened cross correlation function of Backje weir and Gongju weir.

색화 처리 후 0의 시차의 상호상관함수 결과에서 수질학적 인자인 전기전도도, Chl-a, TOC는 양의 상관성이 보였다. 전기전도도는 하천이 가물었을 때 하천 유량이 부족하고 전하를 띤 용존성 물질의 증가와 함께 전기전도도가 증가하고 그로 인해 식물 플랑크톤의 농도 또한 증가한다고 하였다(Kim et al., 2002). 식물 플랑크톤 농도인 Chl-a는 전체 조류량을 대변하는 기준으로 남조류 이외에도 규조류, 녹조류, 기타조류에 의해 표현되는 지표이다. 이는 조류농도의 증가가 남조류 농도의 증가와 동시적으로 이루어진 것으로 판단된다. TOC는 약한 양의 상관성을 띄었는데, TOC는 이는 유기물질을 정량화하는 지표이다. 식물플랑크톤은 광합성을 하는 동안 유기

물을 생산하는데(Tanaka et al., 1974), 이는 TOC와 Chl-a, 그리고 남조류가 함께 증가하는 이유로 판단된다.

Table 6는 백제보에서 0의 시차(lag), 선백색화 처리 후 0의 시차, 선백색화 처리 후 음의 시차와 양의 시차에서의 상호상관함수를 도출한 결과이다. 금강의 3개보 중에 가장 하류에 위치하는 백제보의 경우 선백색화 처리 후 0의 시차에서 pH와의 강한 양의 상관성을 보였는데, 남조류는 광합성을 통해 성장하므로 탄산염 및 중탄산염이 흡수되어 하천의 pH가 함께 증가할 수 있고, 높은 pH에 적응 가능하다고 알려졌다(Paerl et al., 2001). 또한, 금강의 세종보와 공주보의 경우에는 Chl-a와의 상관성이 높게 나왔지만, 백제보의 경우 0.00으로 상관성이 보

Table 4. Exclusive correlation analysis between environmental factors and cell number at Sejong weir

Sejong weir		CCF (0 lag)	Prewhitened CCF (0 lag)	Prewhitened CCF (negative lag)	Prewhitened CCF (positive lag)
General env.	Solar quantity	0.17	-0.04	-	-
	Wind speed	0.22	0.21	-	-
	Water temp.	0.28	-0.02	0.21(-3)	-
	Rainfall	0.19	0.19	-	-
Water quality	BOD	0.32	0.29	-	-
	COD	0.11	0.22	-	0.16 (+1)
	DO	-0.11	-0.04	-	-
	EC	-0.25	-0.10	-	-
	SS	0.33	0.27	-	-
	TOC	0.28	0.19	-	-
	pH	0.07	0.06	-	-
Nutrient salts	Chl-a	0.30	0.25	-	-
	TN	-0.22	-0.02	-	-
	TP	0.20	0.11	-	0.17(+3)
	PO4P	0.08	0.08	-	-
Hydrology	NH3N	-0.18	-0.14	-	-0.20 (+4)
	Overflow	-0.18	0.00	-	-
	Out-flow	0.18	-0.01	-	-
	In-flow	0.18	0.03	-	-
	Water lever	-0.14	-0.07	-0.22(-1)	-
	Storage	-0.12	0.00	-0.17(-2)	-

CCF: cross correlation function
confidence interval: 0.16

이지 않았다. Chl-a는 일반적으로 세포수 계수에 의한 현존량 산출방법으로 조사되는데, 이는 식물 플랑크톤의 심한 세포크기 차이로 인해 보마다 다른 결과가 나온 것으로 보인다(Kim and Kim, 2004). 백제보에서도 공주보와 마찬가지로 전기전도도가 양의 상관성을 보였다. 또한, 수문학적 인자인 방류량과 유입량이 음의 상관성을 보였는데, 방류량과 유입량은 강우 등의 자연적인 현상과 보의 수문개폐 등 인위적인 조치가 개입되므로 0의 시차에서의 관련이 있다고 보기는 무리가 있다고 판단된다.

4.2. 금강 수계 내 음의 시차 배타적 상관성 분석 결과

Table 4 세종보의 선백색화 처리 후 음의 시차에서 상호상관함수 결과를 보면 수온의 경우에는 -3주의 음의

시차에서 0.21의 양의 상관성이 나타났는데 이는 수온이 상승할수록 남조류가 증가하는 경향이 보인다는 기존의 연구에 상응하는 결과이다(Heinle, 1969). 수문학적 요인인 수위와 저수량은 각각 음의 시차에서 음의 상관성을 보였는데 이는 보의 유량이 증가하고 수위와 저수량이 증가하면, 영양물질과 남조류 등의 희석으로 인해 남조류 개수가 낮아진 것으로 보인다.

Table 5 공주보의 선백색화 처리 후 음의 시차에서 상호상관함수 결과를 보면 수문학적 요인인 방류량과 유입량은 같이 음의 상관성을 띄었다. 이것은 강우 등으로 유입량이 증가하는 여름철의 경우 거의 일정한 저수량을 갖는 공주보의 특성상 유입 유량의 대부분을 방류하게 되므로 수체교환이 빠르게 진행되었기 때문으로 생각된다

Table 5. Exclusive correlation analysis between environmental factors and cell number at Gongju weir

Gongju weir		CCF (0 lag)	Prewhitened CCF (0 lag)	Prewhitened CCF (negative lag)	Prewhitened CCF (positive lag)
General env.	Solar quantity	0.23	0.13	-	-
	Wind speed	0.18	0.16	-	-
	Water temp.	0.09	-0.08	0.17(-1)	-
	Rainfall	0.37	-0.02	-	-
Water quality	BOD	0.12	0.08	-	0.16(+5)
	COD	0.14	0.12	-	0.20(+5)
	DO	-0.34	-0.07	-0.20(-1)	-
	EC	-0.10	0.22	-	-
	SS	0.26	0.03	-	-
	TOC	0.20	0.17	-	-
	pH	-0.02	-0.01	-	-
	Chl-a	0.21	0.20	-	0.16(+4)
Nutrient salts	TN	-0.25	0.02	-	-
	TP	0.34	0.05	0.22(-1)	0.16(+1)
	PO4P	0.32	0.13	0.21(-1)	-
	NH3N	-0.04	0.05	-	-0.21(+4)
Hydrology	Overflow	-0.05	-0.11	0.21(-1)	-
	Out-flow	0.06	-0.20	-	-
	In-flow	0.06	-0.21	0.16(-5)	-
	Water lever	-0.12	-0.09	-	-
	Storage	-0.12	-0.09	-	-

CCF: cross correlation function
confidence interval: 0.16

다. 기상학적 인자인 수온은 세종보와 마찬가지로 약한 양의 상관성을 보였다. 이는 수온의 증가는 조류의 생리적 과정을 가속한다는 연구 결과와 일치하는 결과이다 (Heinle, 1969). 영양염류 인자는 T-P와 PO₄-P가 -1주에서 양의 상관관계를 보이고 TN, NH₃-N는 상관성을 보이지 않았다. 이는 남조류와 영양염류 간의 관계에서 남조류 일부는 질소를 대기로부터 고정하기 때문에 질산계열 (TN, NH₃-N) 보다는 인산 계열(TP, PO₄-P)과 유의한 상관성을 나타낸다는 기존 연구와 일치하는 결과로 볼 수 있다(Paerl et al., 2001).

Table 5 백제보의 선백색화 처리 후 음의 시차에서 상호상관함수 결과를 보면 강우량, 월류량, 유입량 탁도와 T-P가 양의 상관성을 보였는데 유입량과 방류량의 경우

강우량에 의해 조작되는 인자이며 강우량이 많아지면 유입량과 방류량이 증가하게 된다. 이는 강우와 강의 유입량 증가에 따른 영양염류와 유기물의 유입에 의한 남조류 증가 요인으로 해석할 수 있다.

4.3. 금강 수계 내 양의 시차 배타적 상관성 분석 결과

선 백색화 과정을 적용한 분석결과 중 양의 시차에서의 상관성은 남조류가 하천 수질과 생태계 변동에 미치는 영향을 파악할 수 있다. Table 4, Table 5, Table 6에서 양의 시차에서 상호상관함수 결과를 보면 세종보, 공주보, 백제보 모두 NH₃-N이 음의 상관관계를 보이는 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 조류의 지수적 증가로 암모니아성 질소가 조류 체내로 흡수되어 농도가 감소했기 때문이다(Cho, 1996). 반대로 영양염류 인자인 T-P는

Table 6. Exclusive correlation analysis between environmental factors and cell number at Backje weir

Backje weir		CCF (0 lag)	Prewhitened CCF (0 lag)	Prewhitened CCF (negative lag)	Prewhitened CCF (positive lag)
General env.	Solar quantity	0.08	0.11	-	-
	Wind speed	-0.01	0.09	-	-
	Water temp.	-0.03	-0.01	-	-
	Rainfall	0.11	-0.02	0.16(-3)	-
Water quality	BOD	0.14	0.06	-	-
	COD	0.17	0.05	-	0.23(+1)
	DO	-0.36	0.06	-0.19(-3)	0.16(+5)
	EC	-0.13	0.18	-	-
	SS	0.34	-0.12	0.19(-1)	0.21(+2)
	TOC	0.11	0.10	-	-
	pH	0.10	0.21	-	-
	Chl-a	0.00	0.00	-	-
Nutrient salts	TN	-0.44	-0.12	-	-
	TP	0.27	-0.06	0.17(-3)	-
	PO4P	0.22	-0.01	-	-
	NH3N	-0.22	-0.12	-	-0.18(+2)
Hydrology	Overflow	-0.12	-0.11	0.19(-3)	-
	Out-flow	0.00	-0.20	-	-
	In-flow	-0.20	-0.29	0.19(-3)	-
	Water lever	0.11	0.00	-	-
	Storage	0.10	0.01	-	-

CCF: cross correlation function
confidence interval: 0.16

세종보와 공주보에서 양의 상관관계를 보이는데 이러한 결과는 남조류 대 발생으로 인한 강한 성층 발생 및 심층수의 혐기화로 인한 오염도가 높은 퇴적토에서 T-P가 용출된 것으로 판단된다(Paerl et al., 2001).

Table 4 세종보의 선백색화 처리 후 양의 시차에서 상호상관함수 결과를 보면 COD는 0의 시차와 1주차의 양의 시차에서 양의 상관성을 보이는데, COD와 조류의 관계는 조류의 분해 및 호흡간의 영향으로 설명될 수 있다(Heiskary and Markus, 2001).

Table 5 공주보의 선백색화 처리 후 양의 시차에서 상호상관함수 결과를 보면 수질학적 인자인 BOD, COD, Chl-a가 양의 상관성을 보인다. Table 6 백제보의 선백색화 처리 후 양의 시차에서 상호상관함수 결과를 보면 COD, DO, SS 와는 양의 상관성을 띤다. 남조류의 과다

성장이 일어나면, 이렇게 생성된 남조류 역시 유기물의 공급원이 되어 수계의 유기탄소 농도(COD, BOD)와 부유물질 농도(SS)가 증가할 수 있는데(Kim et al., 1996) 이 때, 수중의 용존 산소량(DO)은 남조류의 광합성 작용 때문에 증가한다(Kim et al., 2002).

5. 결론

이 논문에서는 금강 수계의 세종보와 공주보, 백제보 유해 남조류 세포수와 환경 인자들을 4대강 공사 후인 2012년부터 2015년 3년 치 일주일 간격 자료를 이용하여 교차 상관분석을 시행하였다. 남조류 세포수와 환경 인자 간의 관계는 선 백색화 과정을 통해 추계적, 자기 상관적, 계절적 성분을 효과적으로 제거하였다. 그 결과

0의 지체시간에서 세종보는 BOD, SS, Chl-a, COD, 풍속, 강수량, pH 순으로 높은 양의 상관성을 나타냈다. 공주보는 EC, Chl-a, 백제보는 pH와 EC순으로 높은 양의 상관성을 보였고, 공주보와 백제보 모두 유입량과 유출량이 음의 상관계수를 나타냈다.

남조류 출현 양상의 특징을 살펴보면 공주보의 경우 전기전도도의 상관성이 높게 도출되었는데, 전기전도도는 하천 유량이 부족할 때 용존성 물질이 증가하면서 남조류 세포수를 증가시킬 수 있다. 또한, 공주보와 백제보의 경우 두 지점 모두 유입량과 유출량에 음의 상관성을 보였는데 이는 강우 등으로 유입량이 증가하면 일정한 저수용량을 갖는 보의 특성 상 유량의 대부분을 방류하므로 수체 교환이 빠르게 진행되었기 때문으로 조사되었다.

남조류 발생 전후 환경인자 변동 특성 이해를 위한 음의 시차와 양의 시차에서의 선백색화 상호상관함수 분석을 추가로 수행했다. 음의 시차에서 세종보는 수온이 양의 상관성을 보이고 수위와 저수량이 음의 상관계수를 나타냈다. 공주보는 총인, 인산염인, 월류량, 수온, 유입량 등이 백제보는 SS, 월류량, 유입량, 총인, 강수량이 양의 상호상관함수가 도출되었고, 공주보와 백제보 모두 DO가 음의 상호상관계수가 나타났다. 양의 시차에서 3개보 모두 COD가 양의 상관성을 보였고, NH₃-N이 음의 상관성이 보이는 공통점이 있었다. 그러나 세종보는 총인, 공주보는 TP, BOD, Chl-a 백제보는 DO, SS의 인자들이 양의 상관성을 보이는 상이한 부분도 있었다.

이러한 결과는 음의 시차인 남조류 증감의 원인은 수온이나 강수량 같은 기상학적인 인자와 그와 상호연관적인 수위나 저류량, 유입량과 같은 수문학적 인자에 의해 결정된다는 것을 보여준다. 또한 남조류 세포수와 환경인자들의 동시적인 변화는 기상학적인 인자와 수질학적 인자, 수문학적 인자의 복합적인 과정에 의해 나타난다고 볼 수 있다. 또한 남조류 발생 후 양의 시차에서 상호상관함수를 보면, COD와 총인 농도가 하천에서 증가하고 NH₃-N이 감소하는 등 남조류 발생 후 일어날 수 있는 조류 분해 및 호흡과 성층현상, 질소 고정능에 의해 영양염류 인자에 더욱 영향을 미치는 것으로 판단된다.

감사의 글

이 연구는 국립환경과학원의 과제와 한국연구재단

BK21플러스 사업의 일환으로 수행된 연구결과이며 (21A20132012304) 이에 감사드립니다.

REFERENCES

- Box, G. E., Jenkins, G. M., Reinsel, G. C., Ljung, G. M., 2015, Time series analysis: Forecasting and control, John Wiley & Sons.
- Cho, K. J., Shin, J. G., 1996, Bioassay for N, P nutrient demand by freshwater algae cultivation of the Nakdong River, Kor. J. Limno., 29, 263-274.
- Choi, J., Min, J. H., Kim, D. W., 2015, Three-dimensional algal dynamics modeling study in lake euam based on limited monitoring data, J. Kor. Society Env., 31(2), 181-195.
- Chong, S. A., Yi, H. S., Hwang, H. S., Kim, H. J., 2015, Modeling the flushing effect of multi-purpose weir operation on algae removal in Yeongsan River, Kor. Society Env., 37(10), 563-572.
- Christoffersen, K., Kaas, H., 2000, Review of toxic cyanobacteria in water. A guide to their public health consequences, monitoring, and management, Limno. Oceano., 45(5), 1212-1212. Retrieved from <http://www.jstor.org/stable/2670717>
- Heinle, D. R., 1969, Temperature and zooplankton, Chesapeake Science, 10(3-4), 186-209.
- Heiskary, S., Markus, H., 2001, Establishing relationships among nutrient concentrations, phytoplankton abundance, and biochemical oxygen demand in Minnesota, USA, rivers. Lake and Reservoir Management, 17(4), 251-262.
- Jeong, K. S., 2004, Application of machine learning to pattern and predict the phytoplankton time-series data in a flow-regulated river system, Master's Dissertation, Pusan National University, Busan.
- Kim, B. C., Kim, E. K., Pyo, D. J., Park, H. D., Heo, W. M., 1995, Toxic cyanobacterial blooms in Korean lakes, J. Kor. Society on Water Quality, 11(3), 231-237.
- Kim, B. C., Kim, D. S., Hwang, K. S., Choi, K. S., Heo, W. M., Park, W. G., 1996, Contribution of primary production of phytoplankton to organic pollution in a eutrophic river, the Naktong River, J. Algae, 11(2), 231-237.

- Kim, S. C., Kim, H. S., 2004, Dynamics of phytoplankton community and the physico-chemical environmental factors in Youngchun Dam, *J. Algae*, 19(3), 227-234.
- Kim, T. J., Jeong, J. C., Seo, R. B., Kim, D. G., Kim, H. M., Chun, Y. S., Park, S. U., Yi, S. H., Park, J. J., Lee, H. J., Lee, J. J., Lee, E. J., 2014, An Initiative study on relationship between algal blooms and asian dust for regulation of algal blooms, *KSBB. J.*, 29(4), 285-296.
- Liu, L. M., Hudak, G. B., Box, G. E., Muller, M. E., Tiao, G. C., 1992, Forecasting and time series analysis using the SCA statistical system, DeKalb, IL: Scientific Computing Associates., 1, 93-160.
- Ministry of Environment, 2015, Nonpoint source management comprehensive plan of Geum river, report1-23, Daejeon.
- National Institute of Environmental Research, 2014, The Characteristics of algae blooms mechanism to environmental changes (I), NIER publication No.11-148 0523-002174-01, Waterd Ecology Research Team, Incheon.
- Paerl, H. W., Fulton, R. S., Moisander, P. H., Dyble, J., 2001, Harmful freshwater algal blooms, with an emphasis on cyanobacteria, *The Scientific World J.*, 1, 76-113.
- Paerl, H. W., Hall, N. S., Calandrino, E. S., 2011, Controlling harmful cyanobacterial blooms in a world experiencing anthropogenic and climatic-induced change, *Science of the Total Env.*, 409(10), 1739-1745.
- Salas, J. D., Delleur, J. W., Yevjevich, V., Lane, W. L., 1988, Applied modeling of hydrologic time series, Water Resource Publication, 241-246.
- Tanaka, N., Masami, N., Kadota, H., 1974, The excretion of photosynthetic products by natural phytoplankton populations in Lake Biwa, *Japan J. Limno.*, 35(3), 91-98.
- Yun, M. K., 2010, Study on cross-correlation and forecasting with multivariate time series, Master's Dissertation, Seoul National University, Seoul.